

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-031735

(43)Date of publication of application : 31.01.2002

(51)Int.Cl.

G02B 6/17

G02B 6/12

H01S 3/094

H01S 3/10

H01S 3/30

(21)Application number : 2001-136395

(71)Applicant : FURUKAWA ELECTRIC CO LTD:THE

(22)Date of filing : 07.05.2001

(72)Inventor : KOSHI HIROYUKI

(30)Priority

Priority number : 2000140369

Priority date : 12.05.2000

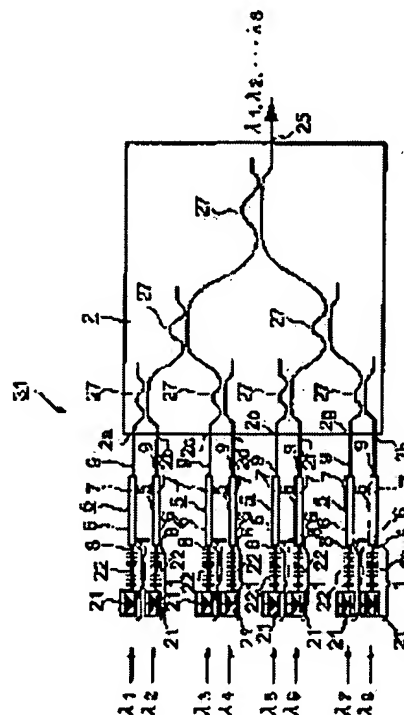
Priority country : JP

(54) MULTIPLEXING MODULE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a wavelength multiplexing module in which multiplexed optical output power is stabilized.

SOLUTION: The module is provided with plural exciting light sources 1 which output light beams having mutually different wavelengths and wavelength multiplexers 2 which multiplex light beams outputted from the light sources 1. Plural optical input sections 2a to 2h are provided to the multiplexers 2 to individually receive outputted light beams from the light sources 1. Depolarizers 5 are provided between the sections 2a to 2h and the corresponding light sources 1 so that polarization degrees of the light beams outputted from the light sources 1 are made close to zero. Each of the depolarizers 5 is formed by serially connecting two polarization holding fibers 6 and 7 provided on an optical path. The fibers are connected so that their main axes cross obliquely each other.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2002-31735
(P2002-31735A)

(43)公開日 平成14年1月31日(2002.1.31)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード [*] (参考)
G 0 2 B	6/17	H 0 1 S	3/10 Z 2 H 0 4 7
	6/12		3/30 Z 2 H 0 5 0
H 0 1 S	3/094	G 0 2 B	6/16 3 0 1 5 F 0 7 2
	3/10		6/12 F
	3/30	H 0 1 S	3/094 S
審査請求 未請求 請求項の数11 O L (全 12 頁)			

(21)出願番号 特願2001-136395(P2001-136395)
 (22)出願日 平成13年5月7日(2001.5.7)
 (31)優先権主張番号 特願2000-140369(P2000-140369)
 (32)優先日 平成12年5月12日(2000.5.12)
 (33)優先権主張国 日本(J P)

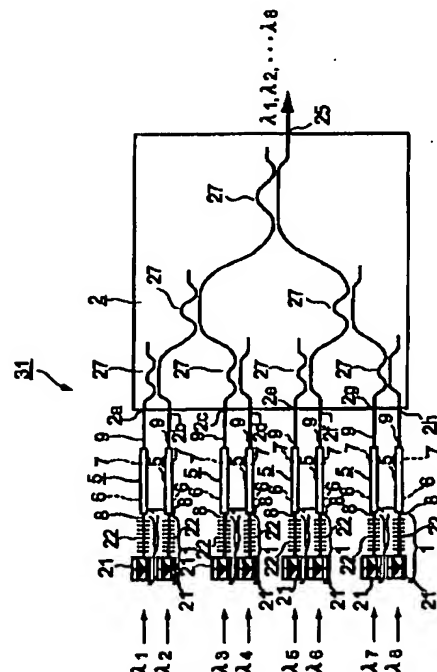
(71)出願人 000005290
 古河電気工業株式会社
 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号
 (72)発明者 越 浩之
 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古
 河電気工業株式会社内
 (74)代理人 100093894
 弁理士 五十嵐 清
 Fターム(参考) 2H047 KB04 KB09 LA18 LA24 MA05
 RA00
 2H050 AC42 AC90
 5F072 AK06 KK07 PP07 QQ07 YY17

(54)【発明の名称】 波長合波モジュール

(57)【要約】

【課題】 合波光出力パワーが安定した波長合波モジュールを提供する。

【解決手段】 互いに異なる波長の光を出力する複数の励起光源1と、各励起光源1から出力された光を合波する波長合波器2とを設け、波長合波器2には各励起光源1からの出力光を個別に受ける複数の光入力部2a~2hを設ける。それぞれの光入力部2a~2hと対応する励起光源1との間にそれぞれ、励起光源1から出力される光の偏光度を零に近づけるデポライザ5を設ける。デポライザ5は光通路に設けられた2本の偏波保持ファイバ6、7を直列接続して形成し、偏波保持ファイバは互いの主軸を斜めに交差させて接続する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 互いに異なる波長の光を出力する複数の励起光源と、各励起光源から出力された光を合波する波長合波器とを有し、該波長合波器は前記各励起光源からの出力光を個別に受ける複数の光入力部を有してそれぞれの光入力部と対応する前記励起光源との間にそれぞれ、前記励起光源から出力される光の偏光度を等に近いけるデポライザを設けたことを特徴とする波長合波モジュール。

【請求項 2】 デポライザ長は励起光源から出力される光の偏光度を 10% 以下にする長さに設定されていることを特徴とする請求項 1 記載の波長合波モジュール。

【請求項 3】 デポライザは光通路に設けられた 1 本以上の偏波保持ファイバであることを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 記載の波長合波モジュール。

【請求項 4】 デポライザは光通路に複数の偏波保持ファイバが直列接続されており、前記偏波保持ファイバは互いの主軸を斜めに交差させて接続されていることを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 又は請求項 3 記載の波長合波モジュール。

【請求項 5】 デポライザは 2 本の偏波保持ファイバを直列接続して構成されて、この 2 本の偏波保持ファイバは互いの主軸を斜めに交差させて接続されており、各励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 は、励起光源のコヒーレンス長を L_c 、偏波保持ファイバの複屈折の値を B としたとき、 $B \cdot L_1 > L_c$ の条件を満足する長さに設定されている請求項 1 又は請求項 2 記載の波長合波モジュール。

【請求項 6】 励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 は、 $B \cdot L_1 > L_c$ の条件を満足する最短長さに設定され、波長合波器側の偏波保持ファイバの長さ L_2 は前記励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 の 2 倍以上の長さとした請求項 5 記載の波長合波モジュール。

【請求項 7】 デポライザは 2 本の偏波保持ファイバを直列接続して構成されて、この 2 本の偏波保持ファイバは互いの主軸を斜めに交差させて接続されており、励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 は、励起光源のコヒーレンス長を L_c 、偏波保持ファイバの複屈折の値を B としたとき、 $B \cdot L_1 > L_c$ の条件を満足する最短長さの 50% 以上の長さに設定され、波長合波器側の偏波保持ファイバの長さ L_2 は前記励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 の 2 倍以上の長さとし、複数の各励起光源に接続されるそれぞれの励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 は互いに等しい長さとし、各波長合波器側に接続されるそれぞれの各波長合波器側の偏波保持ファイバの長さ L_2 は互いに等しい長さとし、請求項 1 記載の波長合波モジュール。

【請求項 8】 偏波保持ファイバの主軸を互いに約 45° の角度で交差させて接続したことを特徴とする請求項 4 乃至請求項 7 のいずれか一つに記載の波長合波モジュール。

ール。

【請求項 9】 偏波保持ファイバの主軸を互いに $45^\circ \pm 4^\circ$ の角度範囲内で交差させて接続したことを特徴とする請求項 4 乃至請求項 7 のいずれか一つに記載の波長合波モジュール。

【請求項 10】 それぞれの励起光源は互いに異なる波長の直線偏波を出力する構成とし、それぞれの励起光源に対応させて設けられるデポライザはそれぞれ 1 本の偏波保持ファイバから成り、それぞれの偏波保持ファイバの主軸を対応する前記励起光源の直線偏波の偏波軸と斜めに交差させたことを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 記載の波長合波モジュール。

【請求項 11】 デポライザの出力端側の偏波保持ファイバの主軸を波長合波器の主軸に位置合わせすることなく接続したことを特徴とする請求項 3 乃至請求項 10 のいずれか一つに記載の波長合波モジュール。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光通信システムに用いられ、異なる波長の複数の波長光を合波する波長合波モジュールに関し、特に光アンプ用励起光源用として適用されて合波励起光出力の安定化を図るための波長合波モジュールに関するものである。

【0002】

【背景技術】近年のインターネットトラフィックの急増を背景に、通信ネットワーク容量の拡大が急務となっている。この要求にこたえるべき 1 つのソリューションがアメリカ合衆国やカナダを中心に進められている DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing; 高密度波長多重) 技術である。この高密度波長多重技術は、1 本の光ファイバに異なる波長の光信号を高密度に複数多重して伝送するため、伝送容量を波長多重分だけ拡大できることで脚光を浴びている。

【0003】図 11 には、DWDM 等の波長多重伝送システムのシステム構成例が示されている。同図に示すように、波長多重伝送システムは、複数の信号光源 11 と、波長多重装置 12 と、光ファイバ 3 と、光増幅器 4 と、波長分波装置 15 と、受光器 16 とを有している。

【0004】複数の信号光源 11 は、互いに異なる波長 (同図においては、 λ_1 、 λ_2 、 \dots 、 λ_N) の光を出力するものであり、波長多重装置 12 は、それぞれの信号光源 11 から発信された互いに異なる波長の複数の光を合波する光合波器により形成されている。光ファイバ 3 は波長多重装置 12 で合波した波長多重光を伝送するものであり、該光ファイバ 3 を伝送する波長多重光は光増幅器 4 により増幅されながら伝搬する。波長分波装置 15 は、光ファイバ 3 を伝搬してきた波長多重光をそれぞれの波長ごとに分波するものであり、受光器 16 は、該波長分波装置 15 で分波されたそれぞれの波長の光を

受信する。

【0005】なお、現在開発されている波長多重伝送システムは、波長 $1.55\mu\text{m}$ (1550nm) 帯域内の波長多重光を伝搬するものであり、したがって、上記それぞれの信号光源11は、波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯域内で互いに異なる波長の光を出力するように構成されている。最近では、さらなる通信容量拡大のため、波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯域 (Cバンド) だけでなく、波長 $1.50\mu\text{m}$ 帯域 (Sバンド) や波長 $1.60\mu\text{m}$ 帯域 (Lバンド) への拡張が検討されている。

【0006】ところで、波長多重伝送システムの実現のためには、波長多重装置12や波長分波装置15等の光デバイスが必要となると共に、光通信用に用いられる既存光デバイスとしての、信号光源11、光ファイバ3、光増幅器4、受光器16等の技術課題も変化している。特に、光増幅器4の光増幅特性は波長多重伝送システムにおける波長多重光の伝送距離や波長多重数を大きく左右するために、光増幅器4の光増幅特性向上が強く望まれている。

【0007】図12には、上記波長多重伝送システムに適用される光増幅器4の基本構成例が示されており、この光増幅器4は、Er (Erbium) ドープ光ファイバ10を備えた光ファイバ型光増幅器である。同図に示すように、この種の光増幅器4は、励起光源装置31と該励起光源装置31から発信される励起光を信号光に合波する光合波器20と、Er ドープ光ファイバ10と、光アイソレータ13、14とを有している。

【0008】励起光源装置31の出力波長は、Er ドープ光ファイバ10の利得帯域に対応させて、一般に 1480nm 帯域と 980nm 帯域が開発されており、目的に合わせてこれらのいずれかの帯域を選択して適用している。また、同図に示すように、一般に、光増幅器4の入射側と出射側にはそれぞれ、光分岐器17、18とフォトダイオード29、30とを備えた信号光強度モニタ機構が設けられ、この信号光強度モニタ機構によって検出された信号光強度に基づいて励起光源1の光出力をフィードバック制御するように構成されている。

【0009】上記のように構成されている光増幅器4の光増幅特性を向上させるためには、励起光源装置31の高出力化が必須であると言われており (例えば、信学会ソサイエティ、C-3-107、1999等) に示されている)、励起光源装置31からの出力をレーザダイオード単体以上に高出力化させるために、2つのレーザダイオードからそれぞれ発した励起光を偏光ビームスプリッタで偏波合成する方法を採用した励起光源装置31が以前から開発されている。

【0010】また、最近では、WDMカブラを用いて、3つ以上の複数の励起光を合波する波長多重励起技術が注目されており、この技術を励起光源装置31に適用する検討がなされている。波長多重励起技術は、例えばT

uH5、OFC'99や信学技報OPE99-10、57、1999等に報告されている。

【0011】図13には、励起光源装置31として、上記波長多重励起技術を適用して形成した波長合波モジュール (励起光源装置) 31の基本構成例が示されている。同図に示すように、波長合波モジュール31は、互いに異なる波長の光を出力する複数の励起光源1と、該複数の励起光源1から出力された光を合波する波長合波器2とを有している。波長合波器2は各励起光源1からの出力光を個別に受ける複数の光入力部2a~2hと合波した光を出力する1つの光出力部25を有している。

【0012】また、この例においては、波長合波器2は、複数のマッハツェンダ干渉型光合波手段27をPLC (Planer Lightwave Circuit) 技術によって作製したWDMカブラであり、低損失な波長合波器2と成している。波長合波器2のそれぞれの光入力部2a~2hには、それぞれ、シングルモード光ファイバの光入力ファイバ9が接続されている。

【0013】前記励起光源1は、それぞれ、レーザダイオード21と励起光出力ファイバ8とを有しており、それぞれの励起光出力ファイバ8にはグレーティング (ファイバグレーティング) 22が形成されている。それぞれのグレーティング22の反射光波長は互いに異なる波長 (同図においては、 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots 、 λ_8 までの8種類の波長) であり、反射光反射率は例えば数%である。

【0014】それぞれのグレーティング22は対応するレーザダイオード21の外部共振器として機能するものであり、このように、グレーティング22を外部共振器として機能させることにより、それぞれのグレーティング22の反射光波長をそれぞれの励起光源1から狭いスペクトル幅で出力させることができ、それぞれの励起光源1の発振スペクトルを波長合波器2の透過帯域より狭く、かつ、安定的にしている。

【0015】波長合波モジュール31を上記のように構成すると、多数の励起光源1からの光の波長を低損失にて合波可能となり、波長合波モジュール31の光出力部25から1Watt以上の高出力を出力できるので、この波長合波モジュール31を励起光源装置31として実用できることが期待されている。

【0016】最近では、この励起光源装置31を波長合波モジュール31として利用したラマン増幅器が非常に注目されている。図15にラマン増幅を利用した波長多重伝送システムのシステム構成例を示す。波長合波モジュール31からの合波励起光をアイソレータ13を介して光合波器20で光ファイバ3に入力する。ラマン増幅は伝送路である光ファイバ3を増幅媒体として利用できるだけでなく、分布型増幅器なので高品質伝送特性が実現できる。また、ラマン増幅は一般に増幅効率が良くないが、励起パワーを著しく高出力化できる波長合波モジ

ジュール 31 の出現により、実フィールドへの導入検討が活性化している（例えば、TuF4、OFC2001にて報告されている）。

【0017】

【発明が解決しようとする課題】ところで、一般に、光の全強度は偏光成分と非偏光成分（無偏波成分）とに分離することが可能であり、全強度に対する偏光成分の割合は偏光度と呼ばれている。上記波長合波モジュール 31 を構成する各励起光源 1 はほぼ 100% の偏光度を有している。

【0018】一方、上記波長合波モジュール 31 を構成する波長合波器 2 は、一般に偏波依存性損失（PDL）を有しており、PDL を有する波長合波器 2 に、励起光源 1 からの偏光度 100% の励起光を入射すると、波長合波モジュール 31 の光出力パワーが波長合波器 2 の偏波依存性損失の影響を受けて大きく変動するといった問題があった。

【0019】すなわち、励起光源 1 の光出力のように偏光度が 100% の光（言い換えれば全強度が偏光成分の光）を波長合波器 2 に入力した場合、波長合波器 2 に接続されている光入力ファイバ 9 の種類や環境条件により、この光入力光ファイバ 9 を伝搬する光の偏波状態がランダムに変動して波長合波器 2 に入力される。したがって、この入力光の偏波状態によって波長合波器 2 の挿入損失が異なることになり、合波光の出力パワーは、最大で波長合波器 2 の偏波依存性損失に相当する分だけ変動することになる。

【0020】例えば、図 14 には、波長合波器 2 の偏波依存性損失値と波長合波器 2 による合波光の出力パワーとの関係例が示されており、同図から明らかなように、波長合波器 2 の偏波依存性損失値が大きいほど、合波光の出力パワーの変動が大きい。

【0021】このように、波長合波モジュール 31 において、波長合波器 2 による合波光の出力パワーが変動すると、この変動に伴い、上記波長合波モジュール 31 を備えた光増幅器 4 による増幅効率が変動し、延いては図 11 に示したような波長多重伝送システムにおける信号光強度の不安定化を招くことになり、高品質の波長多重伝送システムの構築が困難になる。このことは、ラマン増幅を用いた波長多重伝送システム（図 15）についても、同様であり、波長合波モジュール 31 の合波励起光パワーの変動により、その増幅特性が変動し、伝送品質の劣化を招くことになる。

【0022】本発明は上記従来の課題を解決するために成されたものであり、その目的は、互いに異なる複数の波長の光を合波して高出力の安定した合波光を出力することができる波長合波モジュールを提供することであり、例えばこの波長合波モジュールを光増幅器に適用することにより、信号光強度が安定した高品質の波長多重システムの構築を可能とすることである。

【0023】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明は次のような構成をもって課題を解決するための手段としている。すなわち、第 1 の発明は、互いに異なる波長の光を出力する複数の励起光源と、各励起光源から出力された光を合波する波長合波器とを有し、該波長合波器は前記各励起光源からの出力光を個別に受ける複数の光入力部を有してそれぞれの光入力部と対応する前記励起光源との間にそれぞれ、前記励起光源から出力される光の偏光度を零に近づけるデポライザを設けた構成をもって、課題を解決する手段としている。

【0024】また、第 2 の発明は、前記第 1 の発明の構成を備えたものにおいて、デポライザ長は励起光源から出される光の偏光度を 10% 以下にする長さに設定されていることをもって、課題を解決する手段としている。

【0025】さらに、第 3 の発明は、前記第 1 又は第 2 の発明の構成を備えたものにおいて、デポライザは光通路に設けられた 1 本以上の偏波保持ファイバを有している構成をもって、課題を解決する手段としている。

【0026】さらに、第 4 の発明は、前記第 1 又は第 2 又は第 3 の発明の構成を備えたものにおいて、デポライザの光通路には複数の偏波保持ファイバが直列接続されており、前記偏波保持ファイバは互いの主軸を斜めに交差させて接続されている構成をもって、課題を解決する手段としている。

【0027】さらに、第 5 の発明は、前記第 1 又は第 2 の発明の構成を備えたものにおいて、デポライザは 2 本の偏波保持ファイバを直列接続して構成されて、この 2 本の偏波保持ファイバは互いの主軸を斜めに交差させて接続されており、各励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 は、励起光源のコヒーレンス長を L_c 、偏波保持ファイバの複屈折の値を B としたとき、 $B \cdot L_1 > L_c$ の条件を満足する長さに設定されている構成をもって、課題を解決する手段としている。

【0028】さらに、第 6 の発明は、前記第 5 の発明の構成を備えたものにおいて、励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 は、 $B \cdot L_1 > L_c$ の条件を満足する最短長さに設定され、波長合波器側の偏波保持ファイバの長さ L_2 は前記励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 の 2 倍以上の長さとした構成をもって、課題を解決する手段としている。

【0029】さらに、第 7 の発明は、前記第 1 の発明の構成を備えたものにおいて、デポライザは 2 本の偏波保持ファイバを直列接続して構成されて、この 2 本の偏波保持ファイバは互いの主軸を斜めに交差させて接続されており、励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 は、励起光源のコヒーレンス長を L_c 、偏波保持ファイバの複屈折の値を B としたとき、 $B \cdot L_1 > L_c$ の条件を満足する最短長さの 50% 以上の長さに設定され、

波長合波器側の偏波保持ファイバの長さ L_2 は前記励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 の2倍以上の長さと成し、複数の各励起光源に接続されるそれぞれの励起光源側の偏波保持ファイバの長さ L_1 は互いに等しい長さと成し、各波長合波器側に接続されるそれぞれの各波長合波器側の偏波保持ファイバの長さ L_2 は互いに等しい長さと成している構成をもって、課題を解決する手段としている。

【0030】さらに、第8の発明は、前記第4乃至第7のいずれかの発明の構成を備えたものにおいて、偏波保持ファイバの主軸を互いに約 45° の角度で交差させて接続した構成をもって、課題を解決する手段としている。

【0031】さらに、第9の発明は、前記第4乃至第7のいずれかの発明の構成を備えたものにおいて、偏波保持ファイバの主軸を互いに $45^\circ \pm 4^\circ$ の角度範囲内で交差させて接続した構成をもって、課題を解決する手段としている。

【0032】さらに、第10の発明は、前記第1又は第2の発明の構成を備えたものにおいて、それぞれの励起光源は互いに異なる波長の直線偏波を出力する構成と成し、それぞれの励起光源に対応させて設けられるデポライザはそれぞれ1本の偏波保持ファイバから成り、それぞれの偏波保持ファイバの主軸を対応する前記励起光源の直線偏波の偏波軸と斜めに交差させた構成をもって、課題を解決する手段としている。

【0033】さらに、第11の発明は、前記第3乃至第10のいずれかの発明の構成を備えたものにおいて、デポライザの出力端側の偏波保持ファイバの主軸を波長合波器の主軸に位置合わせすることなく接続した構成をもって、課題を解決する手段としている。

【0034】上記構成の本発明の波長合波モジュールにおいては、互いに異なる波長の光を出力する複数の励起光源と、各励起光源から出力された光を合波する波長合波器の光入力部と間にそれぞれ、前記励起光源から出力される光の偏光度を零に近づけるデポライザが設けられているので、各励起光源から出力される光はデポライザによってほぼ無偏波状態とされて波長合波器に入射する。

【0035】そうすると、波長合波器によって合波されて出力される波長多重励起光は、波長合波器の偏波依存性損失の影響を受けることなく、安定した強度となり、波長多重励起光の出力変動を抑制することが可能となる。

【0036】したがって、例えば本発明の波長合波モジュールを波長多重伝送システムに設けられる光増幅器に適用することにより、伝送光強度が安定した高品質の波長多重伝送システムの構築が可能となる。

【0037】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態を図面

に基づいて説明する。なお、本実施形態例の説明において、従来例と同一名称部分には同一符号を付し、その重複説明は省略する。図1には、本発明に係る波長合波モジュールの第1実施形態例の要部構成が示されている。

【0038】本実施形態例の波長合波モジュール31は、図13に示した従来の波長合波モジュール31とほぼ同様に構成されており、互いに異なる波長の光を出力する複数の励起光源1と、各励起光源1から出力された光を合波する波長合波器2とを有しており、本実施形態例が従来例と異なる特徴的なことは、それぞれの光入力部2a~2hと対応する励起光源1との間にそれぞれ、励起光源1から出力される光の偏光度を零に近づけるデポライザ5を設けたことである。

【0039】それぞれのデポライザ5は光通路に設けられた2本の偏波保持ファイバ6、7を有している。図2に示すように、これらの偏波保持ファイバ6、7は直列接続されており、偏波保持ファイバ6、7は互いの主軸（偏波保持ファイバは、スロー軸Sとファースト軸Fから成る主軸を有している。このスロー軸Sとファースト軸Fは互いに直交する）を 45° の角度で斜めに交差させて接続されている。励起光源1側の偏波保持ファイバ6と波長合波器2側の偏波保持ファイバ7の長さは、それぞれ L_1 、 L_2 と成しており、長さ比 $L_1 : L_2 = 1 : 2$ である。

【0040】偏波保持ファイバを用いたこのようなファイバ型デポライザの技術については、例えば、「K. Bohm et al., IEEE Jour. Lightwave Technology, LT-1, 1, pp. 71~74, March 1983.」にて、開示されている。1番目の偏波保持ファイバの主軸に直線偏波が入射した場合には、光はデポライズされないで、あらゆる入射偏光角の光をデポライズするためには、図2に示すように、長さが1:2の偏波保持ファイバを 45° 傾けて接続しなければならない。また、各偏波保持ファイバの長さは、入射する光のコヒーレント長に対応させて調整する必要があることが記載されている。

【0041】なお、偏波保持ファイバ6、7等の偏波保持ファイバの構成は様々であるが、その代表例が同図に示す周知のパンダファイバであり、パンダファイバは、光ファイバ中心に設けられているコアCを両側から応力付与部Pで挟む態様と成している。

【0042】また、本実施形態例において、励起光源1から出力する励起光は波長1480nm帯の光であり、8つの励起光源1からそれぞれ出力される励起光の中心波長は、1450.0nm(λ_1)、1457.5nm(λ_2)、1465.0nm(λ_3)、1472.5nm(λ_4)、1480.0nm(λ_5)、1487.5nm(λ_6)、1495.0nm(λ_7)、1502.5nm(λ_8)である。

【0043】また、本実施形態例でも、各励起光源1を、上記それぞれ波長の光をそれぞれ反射するグレーティング22を外部共振器としたファブリペロー型共振器とすることにより、発振波長の安定化を実現するだけでなく、スペクトル狭窄に起因する波長合波器2の挿入損失を最小限に抑制している。

【0044】また、波長合波器2は、火炎堆積法と反応性イオンエッチング技術を適用して作製したものであり、シリコン基板上に膜厚30μmのSiO₂系ガラスの下部クラッド層を形成し、その上に、断面寸法8.0μm×8.0μmで比屈折率差0.4%のSiO₂-TiO₂系ガラスのコア回路を形成し、さらにコア回路の上部および側部を例えば膜厚30μmのSiO₂系ガラスの上部クラッド層で覆って形成されている。

【0045】コア回路構成は、図13に示した従来の波長合波器2における回路と同様であり、直線パターンおよび曲率半径18mmの円弧パターンを組み合わせ、マッハツェンダ干渉型光合波手段27を多段に接続して形成されている。

【0046】ところで、本実施形態例の構成を決定するにあたり、デポライザ5を形成する偏波面保持光ファイバ6の長さL₁は、デポライザ5によって偏光度を解消したい励起光源1のコヒーレンス長に基づいて最適設計することができるものである。偏波面保持光ファイバ6の長さを以下のようにして決定した。

【0047】すなわち、対応する励起光源1のコヒーレンス長をL_c、偏波保持ファイバ6の複屈折の値をBとし、偏波保持ファイバ6を伝搬する励起光に偏波モード間のクロストークがないと仮定して、式(1)の関係が満足されるとき、直交偏波モード間の可干渉性が失われる。

$$【0048】 B \cdot L_1 > L_c \dots (1)$$

【0049】また、励起光源1のコヒーレント長は、図3に示すような励起光源1の発振スペクトルの中心波長λ_cと半波長幅Δλを用いて、次式(2)で表わされるものである。

$$【0050】 L_c = \lambda_c^2 / \Delta \lambda \dots (2)$$

【0051】例えば図3においては、中心波長λ_cが1480.0nm、半波長幅Δλが1.0nmであるから、式(2)から、この励起光源1のコヒーレント長L_cは2.19mm程度と算出できる。

【0052】一般に、偏波保持ファイバの複屈折の値Bは、B=4×10⁻⁴程度であり、この値を式(1)に代入すると、偏波保持ファイバ6の最適長さL₁=5.48mと求まる。そこで、本実施形態例においては、出力光の中心波長λ_cが1480.0nmの励起光源1と波長合波器2との間に介設するデポライザ5は、長さが5.48mの偏波面保持光ファイバ6と、長さが10.96mの偏波面保持光ファイバ7とを直列接続して形成した。

【0053】なお、デポライザ5を構成する際に、励起光源1側の偏波面保持光ファイバ6の主軸に励起光源1の直線偏波が入射された場合には、励起光は無偏波化されない。あらゆる入射偏波状態の光を無偏波化するために、本実施形態例では、偏波面保持光ファイバ7の長さを偏波保持ファイバ6の2倍の長さとし、偏波面保持光ファイバ7の主軸を偏波面保持光ファイバ6の主軸と45°傾けて接続し、デポライザ5を形成している。

【0054】また、本実施形態例において、それぞれの励起光源1の出力光の中心波長λ_cは互いに異なるため、各励起光源1について、上記と同様にしてデポライザ5を形成する偏波面保持光ファイバ6の最適長さと偏波面保持光ファイバ7の最適長さを求め、偏波面保持光ファイバ6、7の長さをそれぞれ最適長さに決定した。

【0055】各励起光源1の出力光の中心波長λ_cと半波長幅Δλと、これらの値により求まるコヒーレント長L_c、デポライザ5を形成する偏波保持ファイバ6、7の長さL₁、L₂および全長は、表1に示されている。

【0056】

【表1】

励起LD光源			デポライザ		
λ _c (nm)	Δλ(nm)	L _c (mm)	L ₁ (m)	L ₂ (m)	全長(m)
1450.0	1.0	2.10	5.26	10.51	15.77
1457.5	1.0	2.12	5.31	10.62	15.93
1465.0	1.0	2.16	5.37	10.73	16.10
1472.5	1.0	2.17	5.42	10.84	16.26
1480.0	1.0	2.19	5.48	10.95	16.43
1487.5	1.0	2.21	5.53	11.08	16.59
1495.0	1.0	2.24	5.59	11.18	16.78
1502.5	1.0	2.26	5.64	11.29	16.93

【0057】本実施形態例では、それぞれの励起光源1に対応させて、デポライザ5を形成する偏波保持ファイバ6、7の長さL₁、L₂および全長を表1のように決定することにより、それぞれのデポライザ5が、い

ずれも、対応する励起光源1の偏光度をほぼ零とするようにしている。

【0058】なお、上記偏波保持ファイバ6、7の最適長さは、励起光源1の偏光度をほぼ零とする（解消す

る)のに必要な最短の長さであり、偏波面保持ファイバ6、7の長さを上記最適長さより長くした場合も、励起光源1の偏光度解消効果は変わらない。

【0059】本実施形態例は以上のように形成されており、波長合波器2の光入力部2a~2hに設けられた光入力ファイバ9と対応する各励起光源1との間にそれぞれ、各励起光源1から出力される光の偏光度をほぼ零とするデポライザ5を設けたために、各励起光源1から出力される励起光をデポライザ5によってほぼ無偏波状態として波長合波器2に入射し、波長合波器2によ

って合波することができる。
【0060】したがって、波長合波器2によって合波されて出力される波長多重励起光は、波長合波器2の偏波依存性損失の影響を受けることなく、安定した強度となり、波長多重励起光の出力変動を抑制することができ、本実施形態例の波長合波モジュール31を波長多重伝送システムに設けられる光増幅器に適用することにより、信号光強度が安定した高品質の波長多重伝送システムを構築することができる。

【0061】図4の特性線aには、本実施形態例の波長合波モジュール31について、偏波依存性損失(PDL)の値が異なる様々な波長合波器2を適用し、波長合波モジュール31からの出力パワー変動を求めた結果が示されている。なお、同図の特性線bに、本実施形態例におけるデポライザ5を省略した波長合波モジュール31(すなわち、従来の波長合波モジュール31)にお

ける出力パワー変動を同様にして求めた結果を示した。
【0062】同図の特性線aと特性線bとを比較すると明かなように、従来の波長合波モジュール31においては、その出力パワー変動が波長合波器2の偏波依存性損失値に依存し、偏波依存性損失が大きくなるにつれてパワー変動量が大きくなっていたが、本実施形態例においては、波長合波器2の偏波依存性損失値によらず、常に殆ど出力変動がない安定した出力パワーを得られることが確認できた。

デポライザ (有/無)	構成部品の 全PDL (dB)	偏波による 励起光パワー変動 (%)	1Watt励起出力光の 偏波変動パワー (mWatt)
無し	0.6dB	12.1%	130mWatt
有り	0.6dB	0.0%	0mWatt

【0068】そのため、本実施形態例を光増幅器4に適用することにより光増幅器4の増幅特性も非常に安定なものとなることができ、波長多重伝送システムの品質向上を図ることができる。

【0069】次に、本発明に係る波長合波モジュールの第2実施形態例について説明する。本第2実施形態例は上記第1実施形態例とほぼ同様に構成されており、その基本構成は図1に示すものである。本第2実施形態例が上記第1実施形態例と異なる特徴的なことは、励起光源1と対応する波長合波器2の光入力ファイバ9との間に

【0063】図5には、本実施形態例の波長合波モジュール31を波長多重伝送システムの光増幅器用に適用した例が示されている。この例は、図12に示した光増幅器の励起光源装置31として、本実施形態例の波長合波モジュール31を適用したものである。なお、この例では、光増幅器は波長合波モジュール31によってErドープ光ファイバ10を前方励起する構成としているが、波長合波モジュール31によってErドープ光ファイバ10を後方励起する構成としてもよいし、双方向励起する構成としてもよい。

【0064】また、本実施形態例の波長合波モジュール31は、前記の如く波長1480nm帯の励起光を合波して出力するものであるため、図5における光合波器20は、波長1480nm帯の励起光と1550nm帯の信号光を合波する合波器とした。

【0065】ところで、波長多重伝送システムにおいて、光増幅器4を構成する光部品の挿入損失には一般に偏波依存性が存在するものであり、同図において、アイソレータ13と光合波器20と波長合波器2とにそれぞれ0.2dB程度の偏波依存性損失がある。したがって、同図に示す波長合波モジュール31においてデポライザ5を省略した場合(すなわち従来の波長合波モジュール31を適用した場合)は、偏波依存性損失が光増幅器全体で0.6dB程度となる。

【0066】それに対し、本実施形態例ではデポライザ5を設けて波長合波モジュール31を構成することにより、これらの偏波依存性損失を解消(吸収)することができる。したがって、表2に示すように、デポライザ5を設けない場合には、励起光源1の偏波によるパワー変動が12.1%(1Watt励起出力光の場合に130mWatt)生じるのに対し、デポライザ5を設けた本実施形態例を適用することにより上記パワー変動を完全に抑制できる。

【0067】

【表2】

デポライザ (有/無)	構成部品の 全PDL (dB)	偏波による 励起光パワー変動 (%)	1Watt励起出力光の 偏波変動パワー (mWatt)
無し	0.6dB	12.1%	130mWatt
有り	0.6dB	0.0%	0mWatt

介設したデポライザ5を、いずれも、4.0mの偏波保持ファイバ6と8.0mの偏波保持ファイバ7を接続して形成したことである。

【0070】上記第1実施形態例においては、波長合波モジュール31を構成しているそれぞれの励起光源1の中心波長および半値幅に対応させて、偏波保持ファイバ6、7の最適長さを求め、それぞれの偏波保持ファイバ6、7の長さを最適長さとしたが、偏波保持ファイバ6、7の長さが最適長さよりも短くても、励起光源1の偏光度を小さくすることはできる。

【0071】そこで、本発明者は、デポライザ5を形成する偏波保持ファイバ6、7の長さを様々に変えたときのデポライザ5の偏光度解消効果を求めるために、様々な長さの偏波保持ファイバ6、7を用いてデポライザ5を形成し、このデポライザ5に偏光度が100%の光入射してデポライザ5から出力される光の偏光度を測定した。その結果が図6に示されている。なお、デポライザ5の長さは最適長さを1.0に規格化して示した。

【0072】この結果から、励起光源1の偏光度を5%以下に抑制するのに必要なデポライザ5の長さ（偏波保持ファイバ6、7の長さ）は、最適長の65%以上の長さであることが分かった。

【0073】そこで、本第2実施形態例では、図1に示した波長合波モジュール31の構成において、それぞれの励起光源1に対応するデポライザ5の最適長さを表1により参照し、全ての励起光源1に対しデポライザ5の長さが上記最適長さの65%以上となるように、4.0mの偏波保持ファイバ6と8.0mの偏波保持ファイバ7を接続してデポライザ5を形成し、波長合波モジュール31を形成した。

【0074】本第2実施形態例は以上のように構成されており、上記第1実施形態例とほぼ同様のデポライザ5の効果によって、上記第1実施形態例とほぼ同様の効果を奏することができる。

【0075】なお、図7には、本第2実施形態例の波長合波モジュール31について、上記第1実施形態例と同様に、偏波依存性損失（PDL）の値が異なる様々な波長合波器2を適用し、波長合波モジュール31からの出力パワー変動を求めた結果が示されている。なお、同図の特性線bに、本実施形態例におけるデポライザ5を省略した波長合波モジュール31（すなわち、従来の波長合波モジュール31）における出力パワー変動を同様にして求めた結果を示した。

【0076】同図から明らかなように、本第2実施形態例においても、波長合波器2の偏波依存性損失値によらず、常に安定した出力パワーを得られ、波長合波器2の偏波依存性損失が2.0dBの場合でも、出力パワー変動を2.0%以下に抑制できることが確認できた。この変動量は、1Watt出力の波長多重励起光源であれば、たかだか20mWattの出力変動量であり、実用上問題ないレベルである。

【0077】また、本第2実施形態例では、それぞれの励起光源1に対応させて設けるデポライザ5をすべて同一構成（同一長さの偏波保持ファイバ6、7を接続した構成）としているために、上記第1実施形態例よりも製造を容易にすることができる。さらに、第2実施形態例では、励起光源1の偏光度を5%以下に抑制するデポライザ5の説明を行っているが、一般に偏光度が10%以下であれば、実用上まったく問題のないレベルであ

る。10%以下の偏光度を実現するためには、デポライザ5の長さを最適長さの50%以上に設定すればよい。

【0078】図8には、本発明に係る波長合波モジュールの第3実施形態例の要部構成が示されている。本第3実施形態例は上記第1、第2実施形態例と同様に、互いに異なる波長の光を出力する複数の励起光源1と、各励起光源1から出力された光を合波する波長合波器2とを有している。

【0079】本第3実施形態例が上記第1、第2実施形態例と異なる特徴的なことは、励起光源1の励起光出力ファイバ8と波長合波器2の光入力ファイバ9をいずれも偏波保持ファイバにより形成し、この構成によって、それぞれの励起光源1は互いに異なる波長の直線偏波を出力する構成と成し、波長合波器2の光入力ファイバ9をデポライザ5として機能させたことである。

【0080】すなわち、本第3実施形態例においては、励起光源1の励起光出力ファイバ8を偏波保持ファイバとすることにより、励起光出力ファイバ8の長さに関係なく、励起光出力ファイバ8の主軸に一致した直線偏波光が励起光出力ファイバ8から出力されるので、それぞれの励起光源1に対応させて設けられるデポライザ5は、それぞれ1本の偏波保持ファイバである波長合波器2の光入力ファイバ9により構成することができる。

【0081】具体的には、図9に示すように、それぞれの波長合波器2の光入力ファイバ9の主軸に対応する励起光源1の直線偏波の偏波軸（励起光出力ファイバ8の主軸）と斜めに45度の角度で交差させて接続することにより、それぞれの励起光源1から出力される光の偏光度を小さくすることができ、波長合波器2の光入力ファイバ9の長さを前記最適長さL₁以上とすれば、それぞれの励起光源1から出力される光の偏光度をほぼ零にすることができる。

【0082】本第3実施形態例は以上のように構成されており、本実施形態例も上記第1、第2実施形態例と同様の効果を奏することができる。

【0083】また、本第3実施形態例は、デポライザ5を波長合波器2の光入力ファイバ9により構成しているために、デポライザ5の長さを短くすることができ、それにより波長合波モジュール31の小型化を図ることができる。

【0084】また、本第3実施形態例の波長合波モジュール31に際し、本発明者は、デポライザ5の出力端側の偏波保持ファイバである波長合波器2の光入力ファイバ9の主軸を波長合波器2の主軸（波長合波器2を光導波回路とする場合、主軸は、基板面に対して水平方向と垂直方向の2つの軸である）に位置合わせすることなく波長合波モジュール31としている。

【0085】それというのは、波長合波器2に偏波保持ファイバの光入力ファイバ9を接続する場合は、通常、

光入力ファイバ9の主軸を波長合波器2の主軸に位置合わせすることが要求されるものであるが、本第3実施形態例においては、偏波保持ファイバである光入力ファイバ9はデポラライザ5として機能するものであり、波長合波器2に入力される光の偏光度は光入力ファイバ9によってほぼ零とされて入力されるために、光入力ファイバ9の主軸を波長合波器2の主軸に位置合わせする必要がないのである。

【0086】偏波保持ファイバの主軸と波長合波器2の主軸を位置合わせする技術は高精度が要求される非常に難しい技術であり、本第3実施形態例のように、この位置合わせを行わずに波長合波モジュール31を製造することができると、簡単に波長合波モジュール31を製造でき、歩留まりを向上させることができる。

【0087】なお、本発明は上記実施形態例に限定されることはなく、様々な実施の態様を探り得る。例えば上記第1、第2実施形態例では、デポラライザ5を形成する偏波保持ファイバ6、7の主軸を45°斜めに交差させ、上記第3実施形態例では偏波保持ファイバで形成した励起光出力ファイバ8の主軸と偏波保持ファイバで形成した波長合波器2の光入力ファイバ9の主軸を45°斜めに交差させたが、この交差角度は45°とは限らず、偏波保持ファイバの主軸が重ならないように（スロー軸S同士、ファースト軸F同士が重なったり、スロー軸Sとファースト軸Fが重なったりしないように）交差させれば、その交差角度が45°から多少ずれていてもよい。

【0088】図10には、本発明者が偏波保持ファイバ同士の接続部における主軸の交差角度（接続方位角）と偏光度との関係を調べた結果が示されている。この図は、例えば偏光度100%の光を偏波保持ファイバに入力したときの偏波保持ファイバからの出力光の偏光度を求めたものである。偏波保持ファイバからの出力光の偏光度を10%以下に抑制するためには、 $45 \pm 4^\circ$ の交差角度で偏波保持ファイバ同士を接続すればよいことが分かる。偏光度が10%以下であれば、実用上支障が生じない許容範囲である。

【0089】また、上記各実施形態例では、励起光源1から出力される励起光の偏光度はいずれも100%としたが、励起光源1の偏光度は100%未満であっても、上記各実施形態例のようにデポラライザ5によって励起光源1からの出力光を無偏波化することにより、上記各実施形態例で示した優れた効果を奏することができる。

【0090】さらに、上記各実施形態例では、波長合波モジュール31をエルビウムドープ光ファイバ10を備えた光増幅器4に適用するために、波長1480nm帯の励起光を合波して出力する波長合波モジュール31としたが、波長合波モジュール31によって合波する光の波長帯は特に限定されるものではなく適宜設定されるものである。なお、エルビウムドープ光ファイバ10を備

えた光増幅器4に波長合波モジュール31を適用する場合でも、必要に応じて、980nm帯の波長を合波出力する波長合波モジュール31としてもよく、それ以外の波長帯の波長を合波出力するようにしてもよい。特に、本発明の波長合波モジュールはラマン増幅に適用可能であり、合波する波長帯域を選択することにより、様々な帯域（Cバンド、Sバンド、Lバンド、等）のラマン増幅器が実現できる。また、増幅される信号光の波長域も（Cバンド、1550nm帯）に限定されるものでなく、それ以外の波長域にも適用できるのはもちろんである。

【0091】さらに、上記各実施形態例では、波長合波モジュール31は、8つの励起光源1を設け、これらの励起光源1からそれぞれ出力される励起光を合波して出力するモジュールとしたが、波長合波モジュールに設けられる励起光源1などの光源の個数は特に限定されるものでなく適宜設定されるものである。

【0092】さらに、上記各実施形態例では、波長合波器2は、火炎堆積法を用いて形成した石英系光導波回路としたが、波長合波器2は必ずしも石英系光導波回路とするとは限らず、半導体導波路により形成してもよいし、Ti拡散LiNbO₃光導波路、プロトン交換導波路、イオン交換導波路に代表される屈折率分布を有する光導波路で形成した光導波回路としてもよいし、熔融型カプラ等により形成してもよい。

【0093】さらに、上記各実施形態例では、波長合波器2は、マッハツェンダ干渉型光合波手段27を複数多段に接続した回路構成としたが、波長合波器2を構成する回路構成は特に限定されるものではなく適宜設定されるものであり、方向性結合器型、アレイ導波路型回折格子、誘電体多層膜フィルタを挿入した導波路回路等、様々な構成を適用することができる。いずれの回路構成を適用した場合も、本発明は、波長合波器2の偏波依存性損失の影響を抑制して合波光の出力パワーを常に安定したものとすることができる。

【0094】

【発明の効果】本発明によれば、互いに異なる波長の光を出力する複数の励起光源から出力される光をデポラライザによってほぼ無偏波状態して波長合波器に入射することができるために、波長合波器によって合波して出力する波長多重励起光に、波長合波器の偏波依存性損失の影響を与えることなく、常に安定した強度の波長多重光を出力することができる。そのため、例えば本発明の波長合波モジュールを波長多重伝送システムに設けられる光増幅器に適用することにより、増幅効率を安定化させ、信号光強度が安定した波長多重伝送システムを構築できる。また、本発明の波長合波モジュールはラマン増幅器に適用できる。したがって、本発明の波長合波モジュールをラマン増幅を利用した波長多重伝送システムに適用することにより、同様に増幅効率を安定化させ、光

強度が安定した伝送品質の高い波長多重伝送システムを構築することが可能である。

【0095】また、上記デポラライザは、光通路に設けられた1本以上の偏波保持ファイバを有して、例えば複数の偏波保持ファイバを互いの主軸を斜めに交差させて直列接続することにより容易に形成することができるものであり、また、偏波保持ファイバにより形成したデポラライザは小型の光部品とすることができるので、本発明の波長合波モジュールは、小型で作製が容易な波長合波モジュールとすることができる。

【0096】さらに、本発明の波長合波モジュールにおいて、偏波保持ファイバの主軸を互いに約45°の角度で交差させて接続すると、励起光源の光の偏光度をほぼ零とできるデポラライザを容易に形成することができる。

【0097】さらに、それぞれの励起光源は互いに異なる波長の直線偏波を出力する構成と成し、それぞれの励起光源に対応させて設けられるデポラライザはそれぞれ1本の偏波保持ファイバから成り、それぞれの偏波保持ファイバの主軸を対応する前記励起光源の直線偏波の偏波軸と斜めに交差させた本発明の波長合波モジュールによれば、デポラライザを形成する偏波保持ファイバを1本とすることができるために、その分だけ波長合波モジュールの部品点数を低減し、より一層小型の波長合波モジュールを構成できる。

【0098】さらに、デポラライザの出力端側の偏波保持ファイバの主軸を波長合波器の主軸に位置合わせすることなく接続した本発明によれば、デポラライザの出力端側の偏波保持ファイバの主軸を波長合波器の主軸に位置合わせする難しい工程を省略できるために、効率的に、かつ、非常に容易に製造できる波長合波モジュールとすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る波長合波モジュールの第1実施形態例を示す要部構成図である。

【図2】上記実施形態例に設けられているデポラライザの構成を示す説明図である。

【図3】上記実施形態例に設けられている励起光源の出力スペクトル例を示すグラフである。

【図4】上記実施形態例の出力パワー変動を従来の波長合波モジュールの出力パワー変動と共に示すグラフであ

る。

【図5】上記実施形態例の波長合波モジュールを適用した光増幅器の例をシステム組み込み状態で示す説明図である。

【図6】規格化デポラライザ長とデポラライザを通して出力する光の偏光度との関係を示すグラフである。

【図7】本発明に係る波長合波モジュールの第2実施形態例の出力パワー変動を従来の波長合波モジュールの出力パワー変動と共に示すグラフである。

10 【図8】本発明に係る波長合波モジュールの第3実施形態例の要部構成図である。

【図9】上記第3実施形態例における励起光源の励起光出力ファイバと波長合波器の光入力ファイバとの接続状態を示す説明図である。

【図10】デポラライザを形成する偏波保持ファイバ同士との接続方位角とこれらの偏波保持ファイバを通して出力される光の偏光度との関係を示すグラフである。

【図11】波長多重伝送システムのシステム構成例を示す模式図である。

20 【図12】波長多重伝送システムに適用される光増幅器の構成例をシステム適用状態で示す説明図である。

【図13】従来の波長合波モジュールの例を示す説明図である。

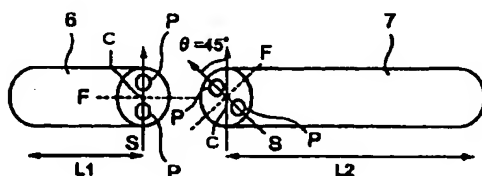
【図14】従来の波長合波モジュールにおける波長合波器の偏波依存性損失と出力パワー変動との関係を示すグラフである。

【図15】ラマン増幅を用いた波長多重伝送システムの一般的な構成を示す説明図である。

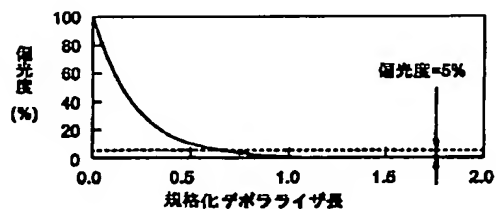
【符号の説明】

- 30 1 励起光源
2 波長合波器
4 光増幅器
5 デポラライザ
6, 7 偏波保持ファイバ
8 励起光出力ファイバ
9 光入力ファイバ
21 レーザダイオード
22 グレーティング (ファイバグレーティング)
27 マッハツェンダ干渉型光合波手段
40 31 波長合波モジュール (励起光源装置)

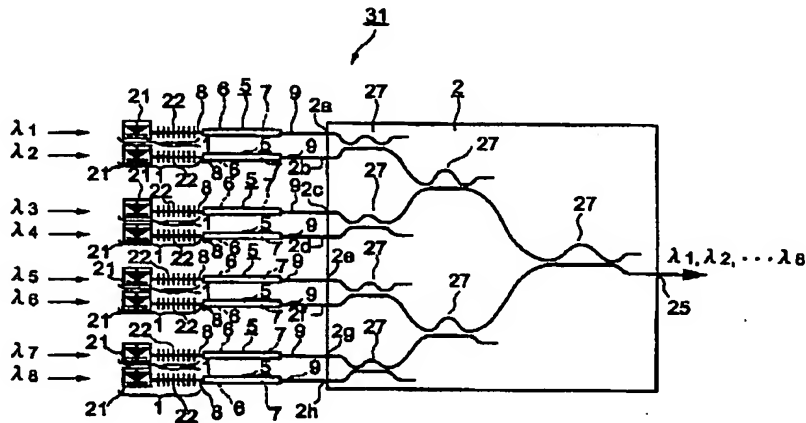
【図2】



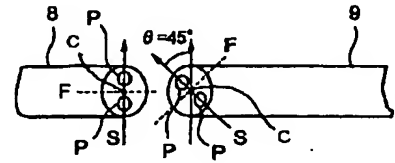
【図6】



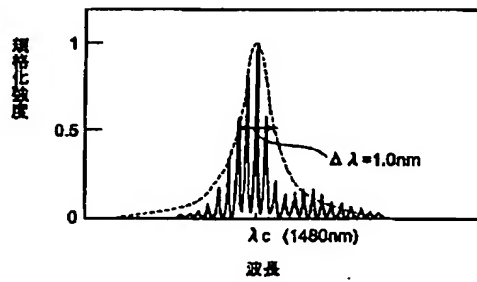
【図1】



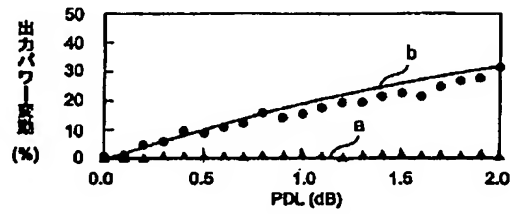
【図9】



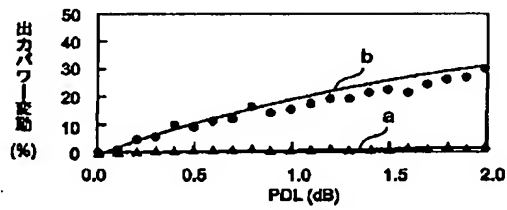
【図3】



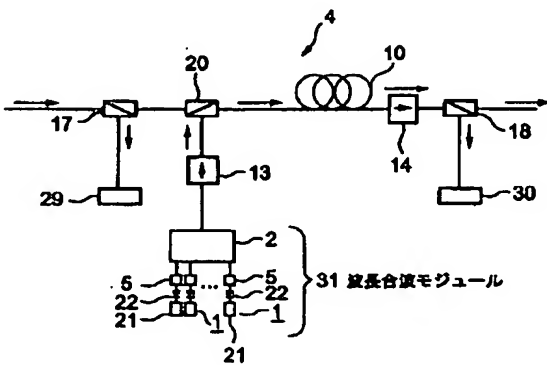
【図4】



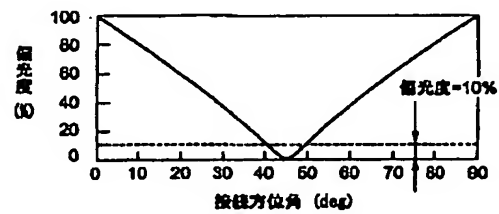
【図7】



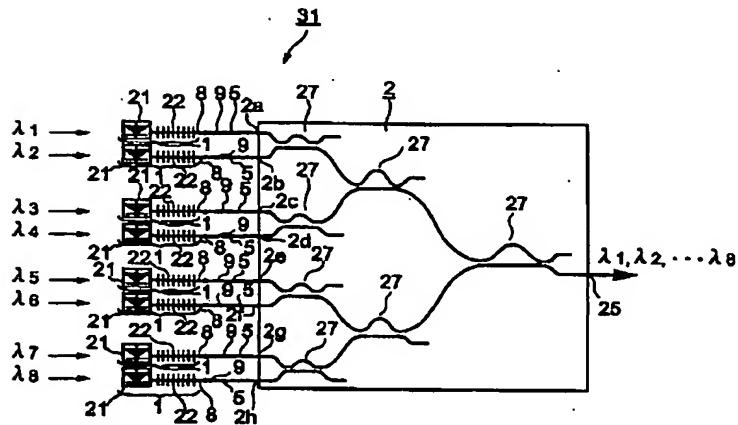
【図5】



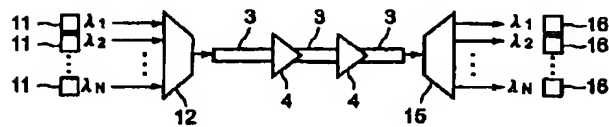
【図10】



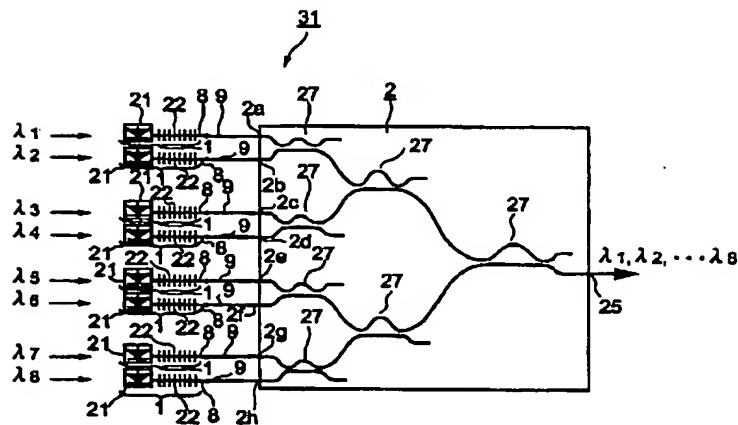
【図 8】



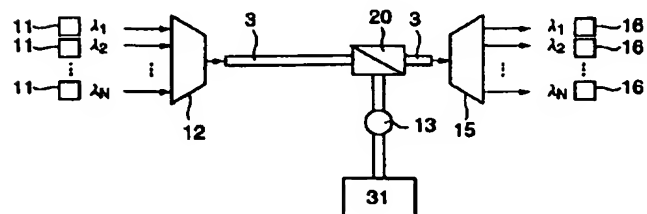
【図 11】



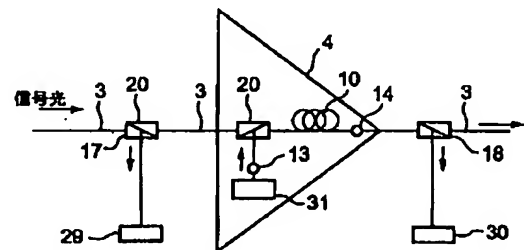
【図 13】



【図 15】



【図 12】



【図 14】

